



## Слияние свободно падающей капли с покоящейся принимающей жидкостью: энергетика и структура течений<sup>1</sup>

Есина Е.В., Чашечкин Ю.Д.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Проведена цветная фото- и видеорегистрация картины течения, возникающего в процессе слияния свободно падающей капли с покоящейся жидкостью при комнатной температуре. Прослежена деформация свободной поверхности и картины переноса вещества в различных режимах. Обсуждаются механизмы распада капли на волокна в импактном режиме. Параметризация процессов проводится на основе полной системы фундаментальных уравнений с физически обоснованными граничными условиями.

Массовость исследований капельных течений (по данным SCOPUS число ежегодных публикаций по теме «Drop impact» превышает тысячу) объясняется рядом причин — фундаментальностью темы, объединяющей классическую и атомно-молекулярную физику, развитием вычислительной и экспериментальной техники, ростом числа практических применений научных результа-

тов в технологиях био-, нефте-, химический, металлургической, фармацевтической и других отраслей промышленности. Научной основой проводимых экспериментов служит система фундаментальных уравнений механики жидкостей, включающая уравнения неразрывности, переноса импульса, энергии и вещества [1] с уравнениями состояния для потенциала Гиббса и плотности вязкой стратифицированной сжимаемой жидкости с физически обоснованными граничными условиями [2]. Анализ системы с учетом условия совместности обеспечивает вывод дисперсионных соотношений для волн и дополняющих лигаментов в слабо диссипативных средах в линейном и слабонелинейном приближениях [2, 3].

Теория течений жидкости развивается в модели сплошной среды. Реальные жидкости и газы состоят из атомов и молекул, которые образуют объединения различного состава. Регистрируются ассоциаты, комплексы, клатраты, кластраты, войды с отдельными атомами, кластеры и другие группы со связями физической и химической природы с линейными размерами от десятков нано- до микрометра и временем существования — от пикодо десятков секунд. Энергия непрерывно эволюционирующих компонентов структуры, которая накапливается при их формировании и освобож-

<sup>1</sup>Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598-П). Эксперименты проведены на стендах УИУ «ГФК ИПМех РАН».

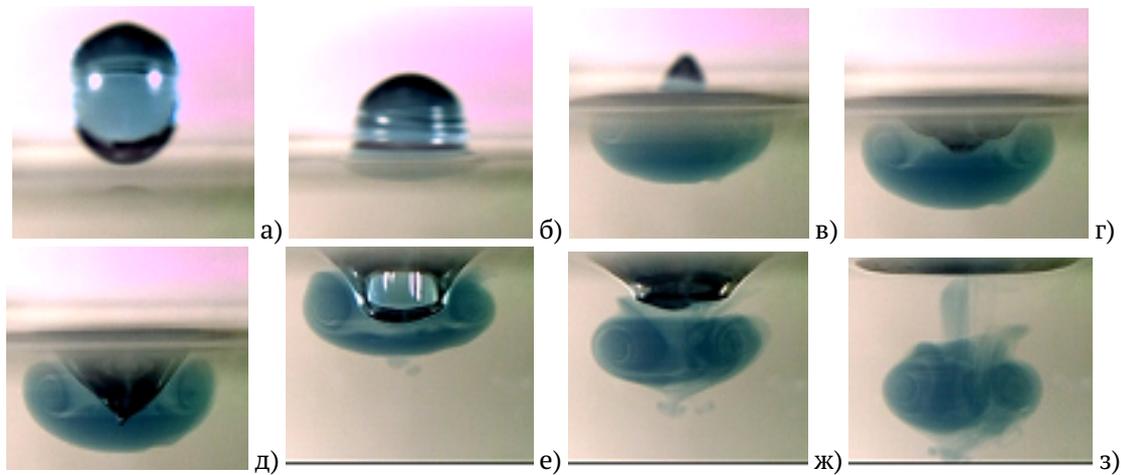


Рис. 1. Слияние капли разбавленного раствора чернил (1:1000) с водой в интрузивном режиме ( $D = 4.3$  мм,  $U = 0.34$  м/с,  $En_\sigma = 4 \mu\text{J}$ ,  $En_k = 2.24 \mu\text{J}$ ,  $Re = 1460$ ,  $Fr = 2.8$ ,  $We = 6.7$ ,  $Bo = 2.5$ ,  $Oh = 0.0018$ ,  $R_{En} = En_k/En_\sigma = 0.57$ ,  $R_W = 5 \cdot 10^4$ ): а)–з) –  $t = -1.75, 3, 11, 14.5, 16.25, 20.5, 28, 38.5$  мс

дается при разрушении, обеспечивает текучесть сред. Конверсия внутренней энергии обеспечивает формирование лигаментов — быстрых тонких струек (пелены, ручейков, триклов) во всех видах течений.

Полная система уравнений и граничных условий определяет размерные параметры задачи: потенциалы Гиббса капли  $G_d$ , воздушной среды  $G_a$  и принимающей жидкости  $G_t$ , плотности сред  $\rho_{d,a,t}$ , кинематическая  $\nu_{d,a,t}$  и динамическая вязкости; коэффициенты диффузии  $\kappa_d$  и поверхностного натяжения: полный  $\sigma_d^a$  и нормированный  $\gamma_d^a = \sigma_d^a/\rho_d$ , эквивалентный диаметр  $D$ , площадь поверхности  $S_d$ , объем  $V$ , масса  $M$ , контактная скорость капли  $U$ ; доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ)  $En_\sigma = \sigma_d^a S_d$ , кинетическая энергия  $E_k = MU^2/2$ , потенциальная энергия в гравитационном поле с ускорением свободного падения  $g$ .

Полная энергия падающей капли  $E_d = E_p + E_k + E_\sigma$  складывается из потенциальной энергии  $E_p$ , экстенсивной кинетической энергии с дифференциалом  $dE_k = 0.5\rho U^2 dV$ , а также доступной потенциальной поверхностной энергии (ДППЭ) распределенной в приповерхностном шаровом слое толщиной в размер молекулярного кластера  $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$  см массой  $M_\sigma$ .

Отношения физических величин образуют наборы собственных временных и пространственных масштабов, определяющих требования к методике измерений, а также безразмерные параметры — числа Рейнольдса  $Re_d = UD/\nu_d$ , Шмидта  $Sc = \nu/\kappa_d$ , Вебера  $We_d = \rho U^2 D/\sigma_d^a$ , Бонда  $Bo = gD^2/\gamma_d^a$ , Онезорге  $Oh_d = \nu_d/\sqrt{\gamma_d^a D}$ , Фруда  $Fr_d = U^2/gD$ , которые используются при описании течений.

Атомно–молекулярные процессы преобразования ДППЭ и передачи кинетической энергии капли характеризуются отношениями компонентов энергии  $R_{En} = En_k/En_\sigma$  и их плотностей  $R_W = En_k M_\sigma/En_\sigma M$ . Доля поверхностной энергии в полном балансе в условиях данных опытов меняется в широких пределах. В то же время, отношение плотностей поверхностной и кинетической энергии всегда большое.

Методика экспериментов и обработки данных разрабатывалась с учетом критерия регистрации крупномасштабных компонентов капельных течений — интрузий, каверны, венца, всплеска, капиллярных волн, и выделения тонких компонентов — первичных брызг, шипов и волокон. Опыты выполнены на стендах Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН» с применением фото- и видеотехники [4].

Выборка видеок кадров, иллюстрирующая последовательную перестройку картины течения в интрузивном режиме слияния капли раствора чернил с водой, когда кинетическая энергия капли меньше ДППЭ, приведена на Рис. 1. Тонкое радиальное течение при первичном контакте жидкостей убирает разделяющие свободные поверхности, остатки которых выносятся на периферию течения. При этом в жидкости формируется непрерывное распределение плотности.

Выступающий остаток капли в сформированной единой среде плавно перетекает в равновесное состояние, жидкость капли вливается в толщу принимающей жидкости и формирует линзовидное окрашенное пятно. С задержкой около  $\Delta t = 10$  мс образуется быстро растущая коническая ка-

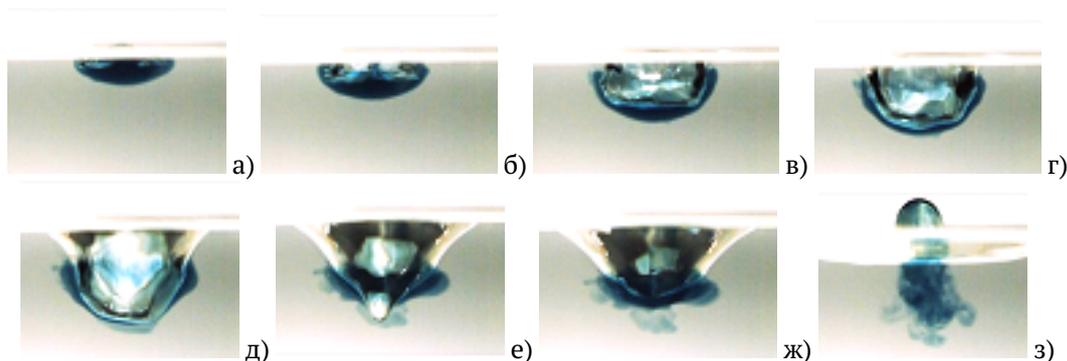


Рис. 2. Слияние капли разбавленного раствора чернил (1:800) с водой в импактном режиме ( $\mu = 0.01$  г/см·с,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 73$  г/с<sup>2</sup>,  $D = 4.3$  мм,  $U = 1.0$  м/с,  $En_\sigma = 4.2\mu\text{J}$ ,  $En_k = 20.8\mu\text{J}$ ,  $Re = 4300$ ,  $Fr = 24$ ,  $We = 60$ ,  $Bo = 2.5$ ,  $Oh = 0.0018$ ,  $R_E = 4.95$ ,  $R_W = 1.7 \cdot 10^{-4}$ ): а)–з) –  $t = 3.5, 5.25, 9.0, 11.5, 18, 23.5, 25.25, 43.5$  мс

верна, которая трансформирует пятно в тороидальное кольцо и сбрасывает его толщу жидкости. Далее кольцо погружается под действием сил плавучести.

В выборке, приведенной на Рис. 2, каверна начинает формироваться с момента первичного контакта, если кинетическая энергия капли превосходит ДППЭ. При этом жидкость капли частично распределяется по поверхности каверны и венца в форме отдельных волокон, образующих линейчатые и ретикулярные формации, частично просачивается в толщу жидкости в форме тонких волокон. Волокна, разделенные прослойками принимающей жидкости, образуют слой жидкости промежуточной плотности, примыкающий к дну каверны.

Постепенно диффузия сглаживает тонкое волокнистое распределение плотности в слое. Одновременно формируются границы промежуточного слоя. При коллапсе каверны и начале формирования всплеска стенку каверны продавливают тонкие струйки в узлах ретикулярной формации. При этом в принимающей жидкости формируется новая система волокнистых петель (Рис. 2 з)).

Картина волокнистого распределения вещества капли в пелене на вершине венца, шипов и облака брызг на начальном этапе слияния капли чернил с водой приведена на Рис. 3 а).

Оценка скорости брызг по длине штрихов, которые рассматриваются как размазанные изображения летящих капелек, показывает, что ее значение больше чем на порядок превосходит скорость капли.

По мере развития течения высота венца растет, число и длина шипов уменьшается, диаметры капелек на их вершинах увеличиваются. Сложная картина распределения пигмента в капельках — следствие вовлечения в быстрое течение обеих контактирующих жидкостей. Наличие пигмента отмечается на всей поверхности венца. Быстрые струйки с повышенным содержанием пигмента оставляют яркие тонкие следы на поверхности венца. Сохранение четкости линейчатой структуры течения по мере эволюции течения — свидетельство стабильности азимутального положения быстрых окрашенных струек на границе области контакта сливающихся жидкостей, которые выносят окра-

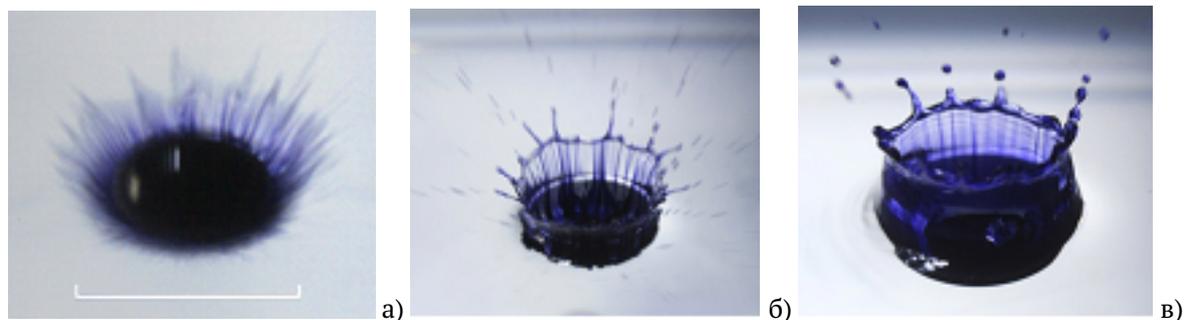


Рис. 3. Эволюция венца и поля брызг при погружении капли чернил ( $D = 0.42$  см,  $U = 3.9$  м/с,  $Re = 16800$ ,  $Fr = 390$ ,  $We = 930$ ,  $Bo = 2.4$ ,  $Oh = 0.0018$ , метка – 0.5 см)

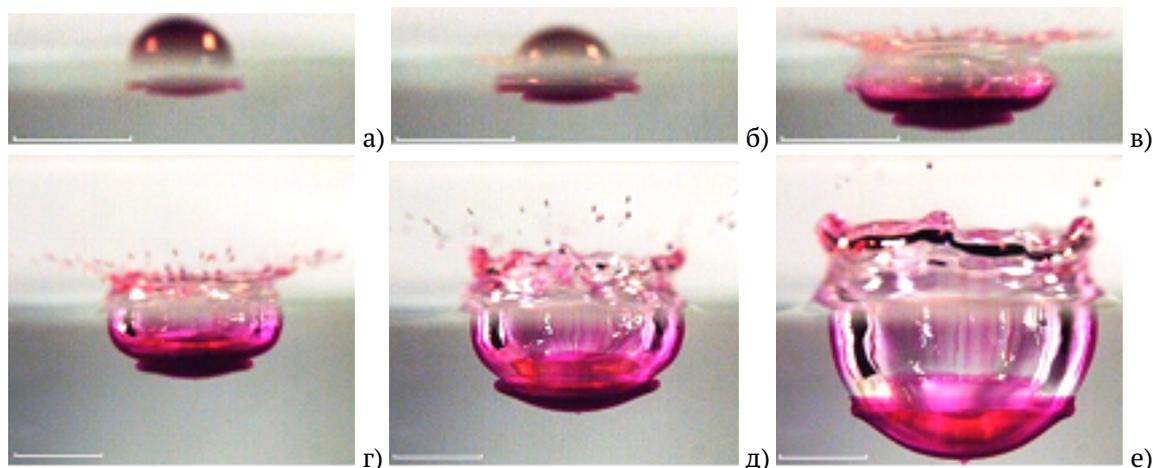


Рис. 4. Картина растекания капли разбавленного раствора перманганата калия (1:100) в воде ( $\rho_d = 1.0 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma_d^a = 73 \text{ г/с}^2$ ,  $\nu_d = 0.01 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $D = 4.3 \text{ мм}$ ,  $U = 3.1 \text{ м/с}$ ,  $E_\sigma = 4.2 \mu\text{J}$ ,  $E_k = 200 \mu\text{J}$ ,  $Re = 13300$ ,  $Fr = 230$ ,  $We = 570$ ,  $Bo = 2.5$ ,  $Oh = 0.0018$ ,  $R_{En} = En_k/En_\sigma = 48$ ,  $R_W = 1.66 \cdot 10^{-3}$ ): а)-е) –  $t = 0.25, 0.5, 1.25, 2.25, 4.0, 8.25 \text{ мс}$

шенное вещество из области слияния, где идет уничтожение свободных поверхностей контактирующих жидкостей.

Яркость окраски прозрачного раствора перманганата калия в воде позволяет одновременно проследить эволюцию базовых структурных компонентов картины слияния жидкостей в импактном режиме — промежуточного слоя, каверны, венца, пелены, шипов и облака брызг. Выборки из видеофильма течения представлены на Рис. 4. Быстро растекающаяся жидкость распределяет вертикальную компоненту импульса падающей капли и формирует плоское дно каверны, к центру которого примыкает узкий слой растущих вертикальных волокон в принимающей жидкости. По мере роста глубины каверны ее форма скругляется, промежуточный слой становится структурно выделенным. Постепенно диффузия выравнивает распределение плотности в слое, который сохраняет свою идентификацию. На последнем кадре выделяются вертикальные волокна в центральной части каверны, более плотно окрашенная нижняя часть и «шапочка» промежуточного слоя, покрывающая дно.

Как показывает анализ полученных оптических изображений течений, возникающих в процессе растекания свободно падающей капли, в формировании структуры течения важную роль играют процессы переноса и трансформации энергии жидкостей, обеспечивающие прямую передачу энергии в течения тонкого масштаба — лигаменты. Именно лигаменты, сингулярно возмущенные компоненты полного решения линеаризованной [1, 2]

и слабо нелинейной системы фундаментальных уравнений механики жидкостей [3], обеспечивают причинную связь между компонентами течений различной природы — струйками, всплеском, венцом каверной, газовыми пузырьками, пакетами поверхностных и акустических волн, физические свойства, пространственные и временные масштабы которых заметно отличаются.

Актуальной задачей теоретической и экспериментальной гидродинамики становится изучение нелинейных моделей течений с учетом всей совокупности компонентов — и крупных (волн, вихрей, струй) и тонких лигаментов.

Авторы благодарны к.ф.-м.н. А.Ю. Ильиных за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. V. 10(4). P. 286.
- [2] Chashechkin Yu. D., Ochirov A. A. Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field // *Axioms*. 2022. V. 11(8). P. 402.
- [3] Chashechkin Yu. D. Conventional partial and new complete solutions of the fundamental equations of fluid mechanics in the problem of periodic internal waves with accompanying ligaments generation // *Mathematics*. 2021. V. 9(6). P. 586.
- [4] Чашечкин Ю.Д. Акустика и гидродинамика импакта капли: два режима излучения звуковых пакетов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. 2023. V. 1(106). P. 23–43.
- [5] Chashechkin Yu.D., Ilinykh A. Y. Intrusive and impact modes of a falling drop coalescence with a target fluid at rest // *Axioms*. 2023. V. 12(4). P. 374.